

# 西南地区太阳总辐射时空变化规律研究

刘泽威, 袁淑杰, 时一文, 茅成铮

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月20日; 录用日期: 2025年7月21日; 发布日期: 2025年7月29日

## 摘要

基于1957~2017年西南地区气象观测资料, 利用线性回归法、Pearson相关性检验法和Mann-Kendall突变检验法, 本研究分析了该区域太阳辐射的时空分布特征及其影响因子, 结果表明: (1) 观测期间西南地区年太阳总辐射每年以 $-1.14 \text{ MJ/m}^2$ 的速度下降, 但下降趋势不显著, 太阳总辐射发生突变的年份是1995年。(2) 西南地区月平均太阳总辐射变化呈现单峰变化趋势; 夏季太阳辐射最强, 平均值为 $1476.51 \text{ MJ/m}^2$ , 春季次之, 平均值为 $1416.61 \text{ MJ/m}^2$ , 冬季最弱, 平均值为 $861.83 \text{ MJ/m}^2$ 。(3) 西南地区太阳总辐射空间分布表现为西部最高, 平均值为 $6880.06 \text{ MJ/m}^2$ , 呈阶梯式向东部逐渐降低。(4) 总云量对太阳总辐射的影响程度最大, 呈显著负相关; 其次是大气水汽含量, 呈显著负相关; 能见度的影响程度最小, 仅在夏季呈显著正相关。

## 关键词

太阳总辐射, 总云量, 大气水汽含量, 西南地区

# Study on the Spatiotemporal Variation of Global Solar Radiation in Southwest China

Zewei Liu, Shujie Yuan, Yiwen Shi, Chengzheng Mao

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 20<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2025; published: Jul. 29<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Based on meteorological observation data from 1957 to 2017 in Southwest China, this study analyzed the spatiotemporal distribution characteristics of solar radiation and its influencing factors using

linear regression, Pearson correlation analysis, and the Mann-Kendall mutation test. The results indicate that: (1) Annual total solar radiation decreased at a rate of  $-1.14 \text{ MJ/m}^2$  per year during the observation period, though this declining trend was not statistically significant. An abrupt change occurred in 1995. (2) Monthly total solar radiation exhibited a unimodal variation pattern. Summer recorded the strongest radiation (average:  $1476.51 \text{ MJ/m}^2$ ), followed by spring ( $1416.61 \text{ MJ/m}^2$ ), with winter having the weakest ( $861.83 \text{ MJ/m}^2$ ). (3) Spatially, total solar radiation was highest in western regions (average:  $6880.06 \text{ MJ/m}^2$ ) and gradually decreased eastward. (4) Total cloud cover exerted the strongest negative influence on total solar radiation, showing a significant negative correlation. Atmospheric water vapor mass demonstrated the second strongest significant negative correlation. Visibility had the weakest impact, exhibiting a significant positive correlation only during summer.

## Keywords

Global Solar Radiation, Total Cloud Cover, Column-Integrated Atmospheric Water Vapor Content, Southwestern China

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

太阳辐射是地球自然变化最基本、最重要的能量来源，是天气和气候系统形成、发展和演变的根本动力[1]，因此始终是气象学家密切关注的问题。特别是近几十年来，受人类活动导致的大气污染和环境变化的影响，地面太阳辐射发生了明显变化[2]。研究地面太阳辐射的变化不仅有助于掌握区域气候特征和预测未来变化趋势，而且也有助于研究人类活动对气候变化的影响。同时，太阳能资源作为一种清洁无污染的可再生能源，早已成为新能源开发的首选，在应对能源危机方面也受到社会的广泛关注[3] [4]。

学者们对太阳总辐射时空分布特征展开了大量研究。20世纪60年代到80年代中期，地球表面的太阳辐射平均每年下降0.32%，从1983~2001年地球表面的太阳辐射平均每年上升0.1% [5] [6]，并出现从“全球变暗”向“全球变亮”转变的现象[7] [8]。查良松、李晓文等研究发现，我国从“变暗”转变为“变亮”的时间转折点为1989年[9] [10]。此外，有部分学者针对中国范围内太阳总辐射的年际变化进行了分析。陈志华对1957~2000年中国地面太阳辐射状况进行研究[11]。谢今范等人研究了近50年东北地区地面太阳辐射变化及原因分析[12]。温松楠研究了西北地区太阳辐射时空变化特征[13]。钱莉等人研究了1960~2009年河西走廊东部太阳辐射变化规律及太阳能资源利用分析[14]。受当地地形、地貌和气候条件的限制和影响，不同区域的太阳辐射时空变化特征存在一定差异。

西南地区地貌地形复杂，海拔由高到低依次是青藏高原、横断山脉、云贵高原和四川盆地。四川盆地为中亚热带湿润气候，云贵高原为亚热带季风气候，青藏高原地形复杂，气候种类多，主要为高原气候。研究西南地区太阳总辐射的时空变化规律，对于掌握该区域气候变化规律、农业气候资源评估与太阳能资源利用有重要作用。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料

研究选用1957~2017年的中国辐射日值数据集，该资料来源于中国气象局气象中心资料室。云量和能见度资料来源于NOAA(美国国家海洋和大气管理局)发布的逐日数据，水汽含量资料来源于NOAA发

布的逐月数据。为了方便研究太阳总辐射及影响因子季节变化趋势, 本文使用传统气象学上对四季的划分, 春季为 3~5 月, 夏季为 6~8 月, 秋季为 9~11 月, 冬季为 12 月至次年 2 月。

## 2.2. 方法

西南地区辐射站点分布非常稀疏, 为了更精确的分析该区域辐射分布情况, 本文首先计算出西南地区太阳总辐射, 基本方法为基于日照百分率(日照时数  $S$  与可照时数  $S_0$  的比值)和晴空指数(日总辐射  $Q$  与天文辐射  $Q_0$  的比值)之间的线性关系[15]:

$$Q = Q_0 \left( a + b \frac{S}{S_0} \right) \quad (1)$$

$S$  和  $Q$  为站点实测数据, 可照时数  $S_0$  和天文辐射  $Q_0$  可根据站点经纬度计算, 方法见文献[17] [18]。

计算思路为根据已知辐射站点测得的太阳辐射值和日照百分率, 计算出该站点的参数  $a$  和  $b$ , 然后使用反距离权重法将其插值到日照站点中, 再根据日照站点的实测的日照百分率, 模拟计算总辐射值。本文使用 1957~2017 年 122 个日照站点旬日照时数对旬太阳总辐射进行拟合, 使用 1957~2017 年 18 个辐射站点太阳总辐射实测值进行检验。表 1 为不同站点模拟值与实测值的误差分析及显著性检验。结果显示, 18 个辐射站点旬太阳辐射平均绝对误差大部分小于  $15 \text{ MJ/m}^2$ , 平均相对误差大部分小于 15%, 说明拟合效果较好, 能够代表西南不同地区的太阳总辐射。

此外, 太阳总辐射的年际变化和逐月变化特征利用线性回归法进行研究, 太阳总辐射的突变特征选用 Mann-Kendall 检验法, 该方法优点是不需要样本遵从一定分布, 并对异常值不敏感。利用 Pearson 相关性检验法对太阳辐射影响因子与太阳辐射相关性进行研究。

**Table 1.** Error analysis between simulated data and measured data

**表 1.** 模拟数据与实测数据的误差分析

台站	相关系数(r)	平均绝对误差(MJ/m <sup>2</sup> )	平均相对误差(%)
万州	0.98***	0.13	0.57
温江	0.98***	0.18	0.62
高坪	0.97***	0.16	0.58
沙坪坝	0.97***	0.14	0.57
威宁	0.96***	0.16	0.59
乐山	0.96***	0.17	0.53
昭通	0.95***	0.17	0.63
甘孜	0.94***	0.31	0.48
贵阳	0.93***	0.17	0.54
丽江	0.93***	0.24	0.53
攀枝花	0.92***	0.20	0.48
昆明	0.90***	0.19	0.52
红原	0.89***	0.21	0.64
峨眉山	0.87***	0.20	0.61

续表

昌都	0.86***	0.22	0.58
腾冲	0.85***	0.22	0.50
狮泉河	0.82***	0.20	0.59
那曲	0.73***	0.23	0.53

注：\*\*\*表示在 0.001 水平上显著相关。

### 3. 研究结果

#### 3.1. 太阳辐射年际变化

图 1 为 1957~2017 年西南地区太阳辐射年际变化图。由图可见西南地区太阳总辐射多年平均值为 4812.05 MJ/m<sup>2</sup>，在 1990 年前之前，太阳辐射平均值为 4847.09 MJ/m<sup>2</sup>，高于多年均值；在 1990 年以后，太阳辐射平均值为 4769.23 MJ/m<sup>2</sup>，低于多年均值。观测期间该区域太阳辐射整体呈现下降趋势，年下降率达 -1.14 MJ/(m<sup>2</sup>·a)。对太阳辐射的下降趋势进行显著性检验，计算出太阳辐射与时间的相关系数  $r = 0.14$ ，统计量  $T = -1.15$ 。选用显著性水平  $\alpha = 0.05$ 。查  $t$  分布表得到  $T_{\alpha} = 1.671$ ，因为  $T < T_{\alpha}$ ，所以认为变量太阳辐射的线性变化在  $\alpha = 0.05$  的水平上不显著。

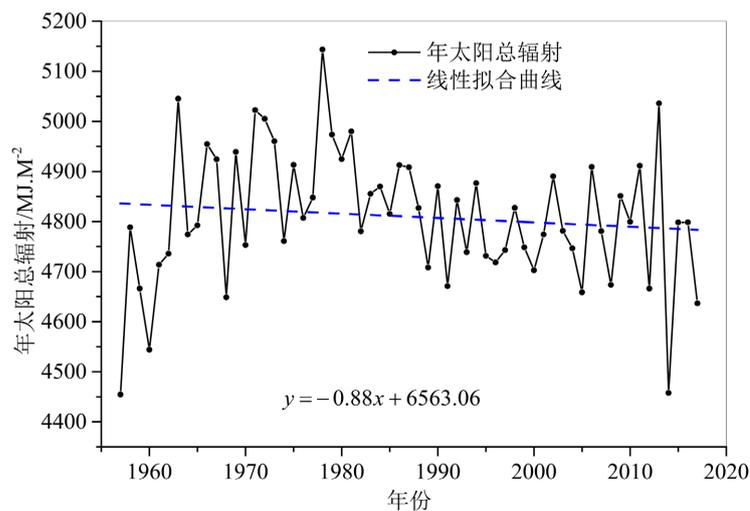
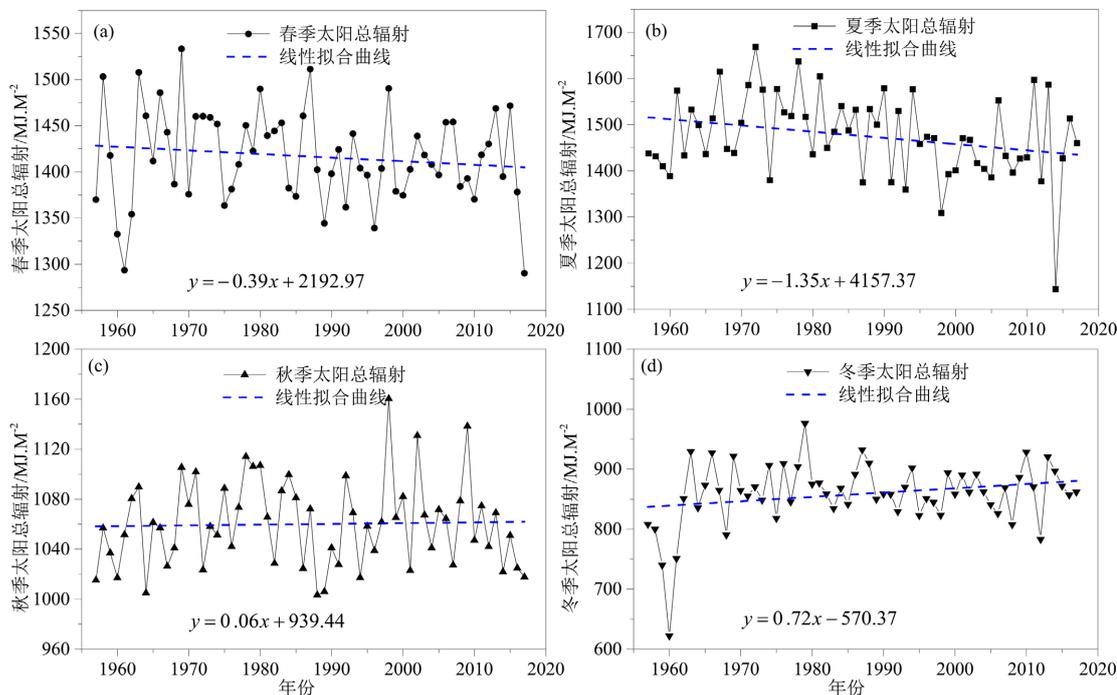


Figure 1. Interannual variation trend of solar radiation in Southwest China  
图 1. 西南地区太阳辐射年际变化趋势

#### 3.2. 太阳辐射季节变化

图 2 表示西南地区太阳总辐射在不同季节的年际变化趋势。由图可得西南地区春季总辐射变化趋势不显著，年下降率为 -0.41 MJ/(m<sup>2</sup>·a)，平均值为 1416.61 MJ/m<sup>2</sup>；夏季太阳总辐射为下降趋势，通过显著性水平  $\alpha = 0.05$  检验，年下降率达 -1.51 MJ/(m<sup>2</sup>·a)，平均值为 1476.50 MJ/m<sup>2</sup>；秋季太阳总辐射变化趋势不显著，年上升率为 +0.03 MJ/(m<sup>2</sup>·a)，平均值为 1060.49 MJ/m<sup>2</sup>；冬季太阳总辐射变化趋势不显著，年上升率达 +0.48 MJ/(m<sup>2</sup>·a)，平均值为 861.83 MJ/m<sup>2</sup>。相关研究表明，夏季太阳辐射对太阳总辐射的总量起主要作用，同时太阳总辐射的年际变化也是夏季太阳辐射起主要作用[18]，结合上文分析可以得到西南地区夏季太阳辐射与太阳总辐射的变化是一致的，呈下降趋势。

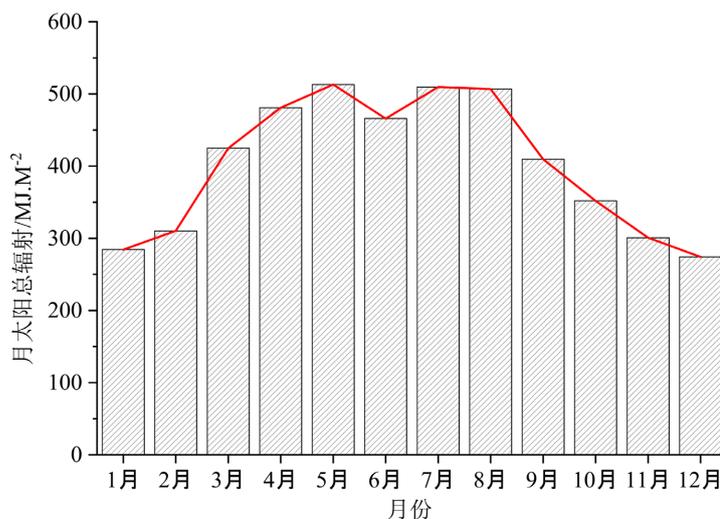


**Figure 2.** Interannual variation trends of solar radiation in Southwest China during (a) Spring, (b) Summer, (c) Autumn, and (d) Winter

**图 2.** 西南地区太阳辐射(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季年际变化趋势

### 3.3. 太阳辐射逐月变化

图 3 表示太阳总辐射的逐月变化。太阳总辐射表现为先增长后下降的趋势, 1~5 月太阳辐射显著增加, 于 5 月达到最大值 512.99 MJ/m<sup>2</sup>; 5~8 月无显著上升与下降, 但是 6 月太阳总辐射略低于其他月份。8 月后太阳总辐射快速下降, 直至 12 月达到最小值 274.26 MJ/m<sup>2</sup>。对月总辐射的分析表明西南地区夏季太阳辐射对太阳辐射年值的贡献最大, 其次是春季太阳辐射, 之后是秋季太阳辐射, 冬季太阳辐射贡献最小。



**Figure 3.** Month-to-month variation of solar radiation in Southwest China

**图 3.** 西南地区太阳辐射逐月变化

### 3.4. M-K 突变分析

图 4 表示年太阳总辐射 M-K 突变检验。1996 年以前, UF 曲线小于 0, 在 1965~1967 年和 1971~1987 年下降趋势显著; 1996 年以后, UF 曲线大于 0, 上升趋势不显著。结合前文的线性回归分析, 整体是下降趋势。给定显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 那么置信区间为 $[-1.96, 1.96]$ , 图 4 中 UF 曲线和 UB 曲线有 1 个交点, 这个交点出现在置信区间中, 说明太阳总辐射在 1995 年出现突变, 突变前的太阳总辐射到突变后的太阳总辐射减少  $68.66 \text{ MJ/m}^2$ 。

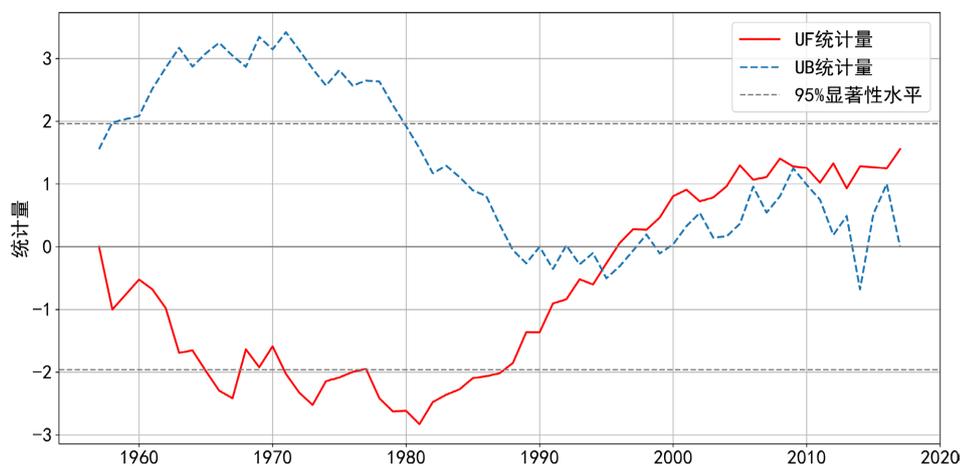
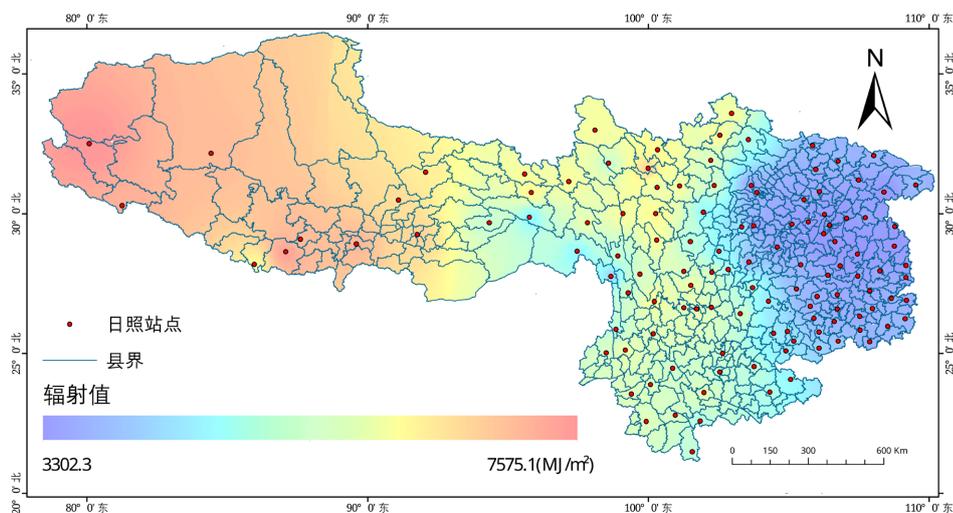


Figure 4. Annual solar radiation Mann-Kendall test in Southwest China

图 4. 西南地区年太阳辐射 M-K 检验

### 3.5. 太阳辐射空间分布特征

图 5 表示西南地区年太阳辐射空间分布特征。太阳辐射分布呈现出西部高, 东部低的阶梯式变化。高值地区主要分布在西藏中部和西藏西部, 最高值为  $7575.10 \text{ MJ/m}^2$ , 低值地区主要分布在重庆和贵州一带, 最低值为  $3302.30 \text{ MJ/m}^2$ 。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2556 号的标准地图制作, 底图无修改。

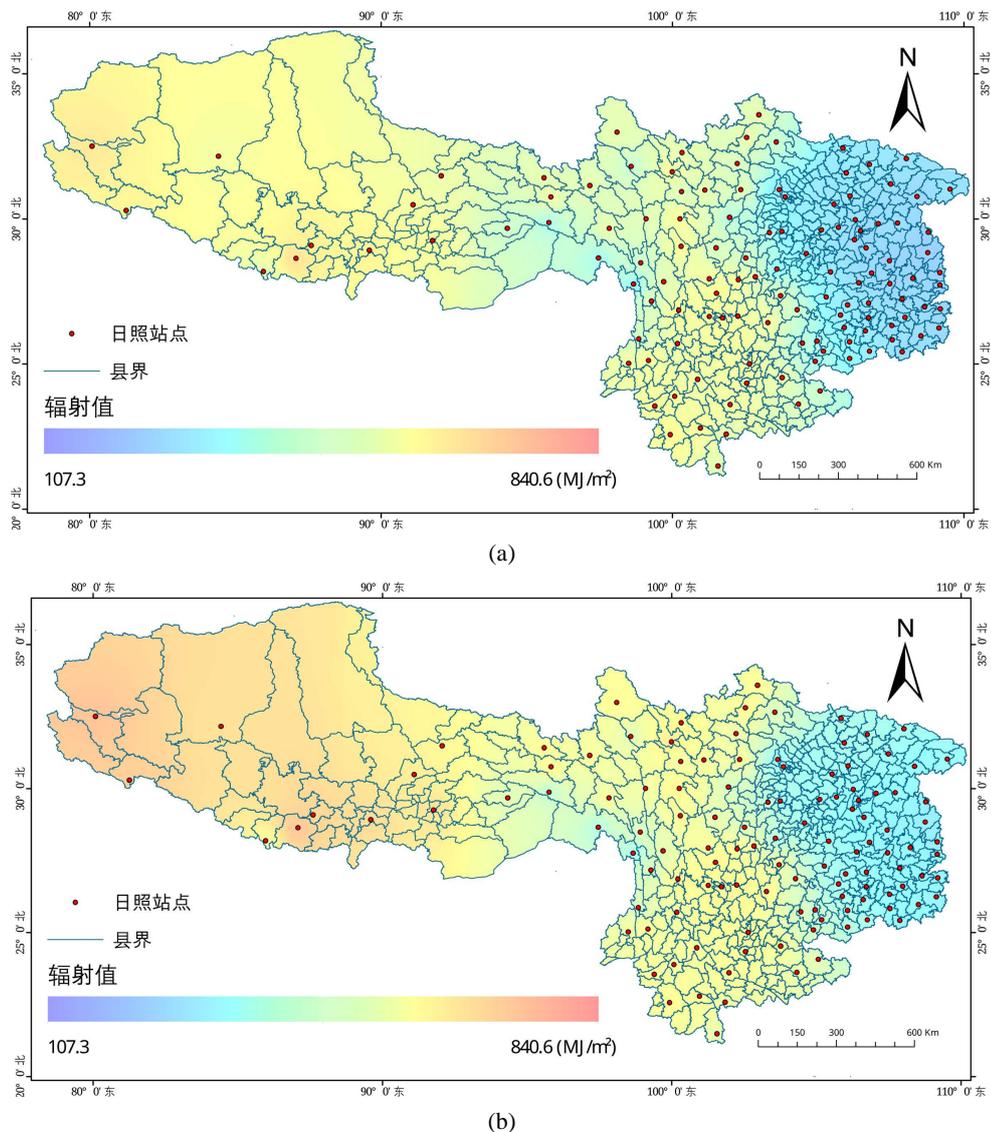
Figure 5. Spatial distribution of annual solar radiation in Southwest China

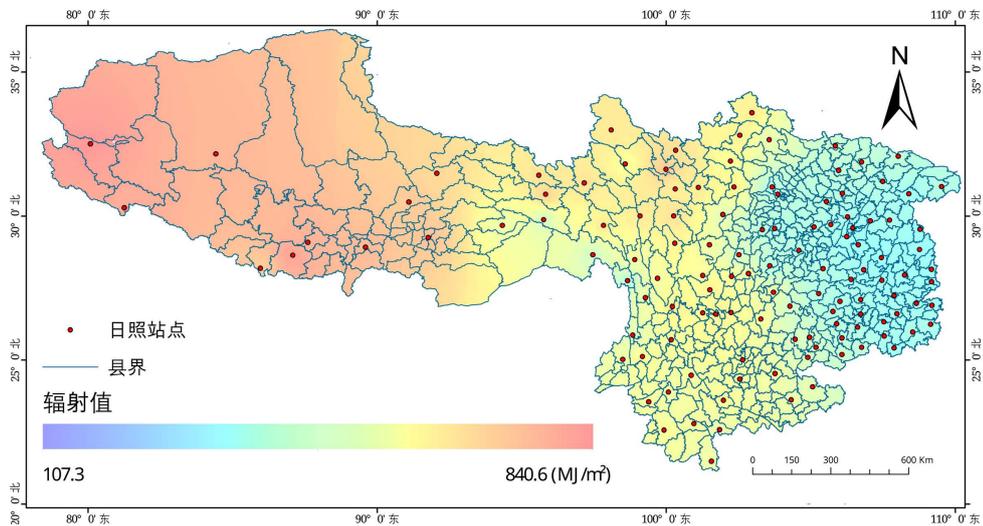
图 5. 西南地区年太阳辐射空间分布

图6表示西南地区太阳辐射逐月空间分布。3月、4月、5月平均太阳辐射值分别是427.17 MJ/m<sup>2</sup>、483.05 MJ/m<sup>2</sup>和516.29 MJ/m<sup>2</sup>。西藏西部、贵州东部、重庆及四川大部分地区月平均辐射呈增大趋势，云南大部分地区月平均辐射变化趋势不明显。6月、7月、8月平均太阳辐射值分别是469.14 MJ/m<sup>2</sup>、510.91 MJ/m<sup>2</sup>、507.73 MJ/m<sup>2</sup>。西藏西部辐射呈减小趋势，四川西北部辐射表现为先增大再减小，四川东部、重庆、云南及贵州大部分地区月平均辐射都是先增大后无明显变化。9月、10月、11月平均太阳辐射值分别是411.78 MJ/m<sup>2</sup>、354.73 MJ/m<sup>2</sup>、302.59 MJ/m<sup>2</sup>。总辐射空间分布类似于3~5月辐射空间分布。整个西南地区在9~11月的平均太阳辐射呈现减小趋势。12月，次年1月和2月平均太阳辐射值分别是275.50 MJ/m<sup>2</sup>、285.60 MJ/m<sup>2</sup>、312.59 MJ/m<sup>2</sup>。其中，西藏西部、四川西部和云南大部分地区的辐射值相当，大于重庆和贵州大部分地区。西南地区在12月至次年2月的平均太阳辐射呈增大趋势。

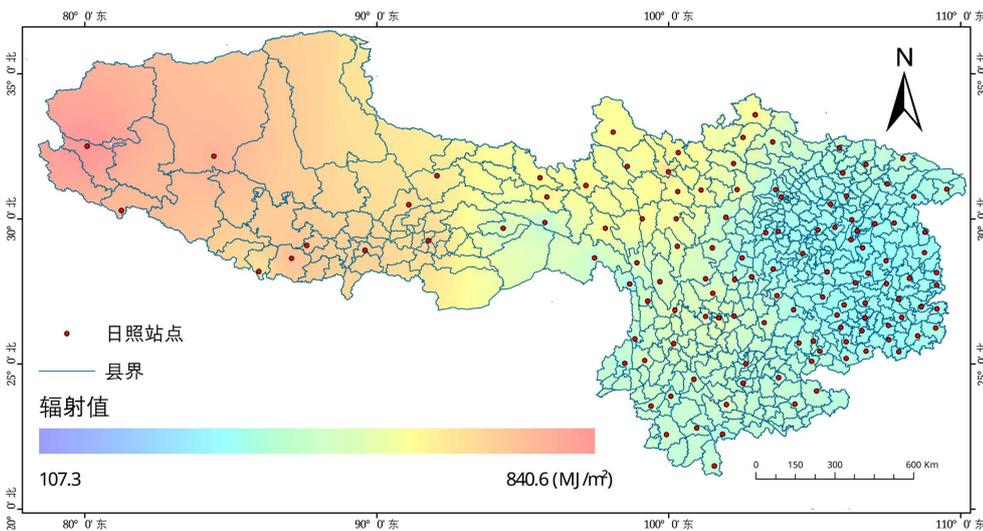
### 3.6. 太阳总辐射影响因子分析

表2表示西南地区太阳辐射影响因子与太阳辐射的相关性。从年际上看，西南地区太阳总辐射与总云量、水汽含量之间存在显著的负相关关系，尤其是总云量，但是能见度与太阳总辐射之间的关系不显著。

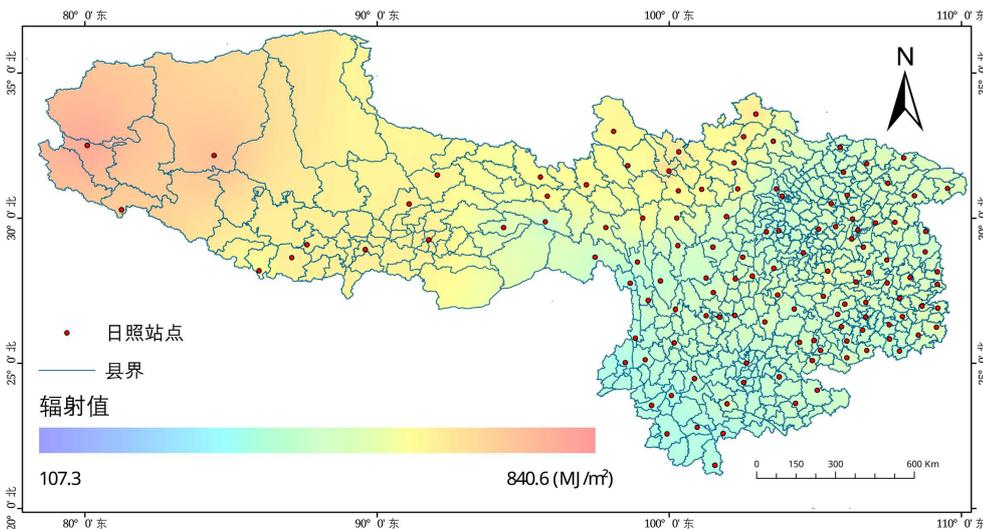




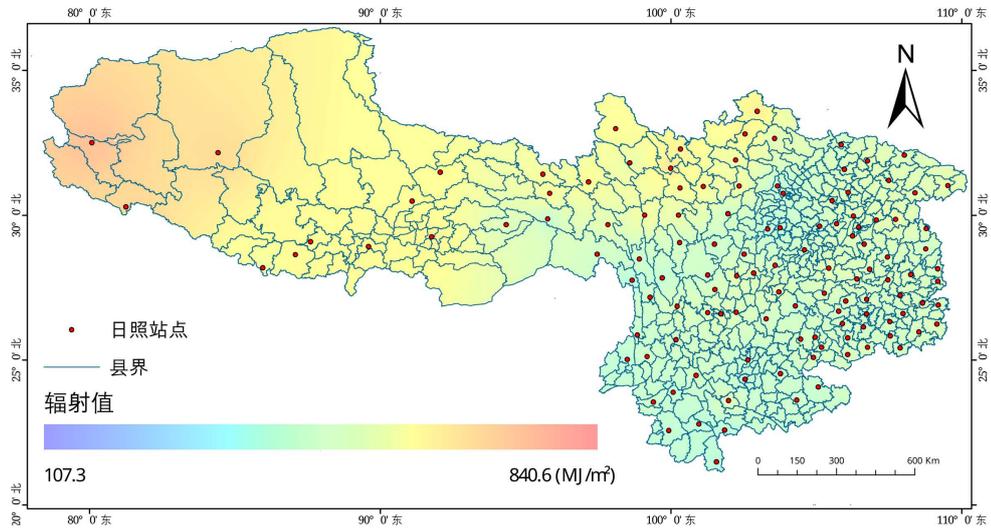
(c)



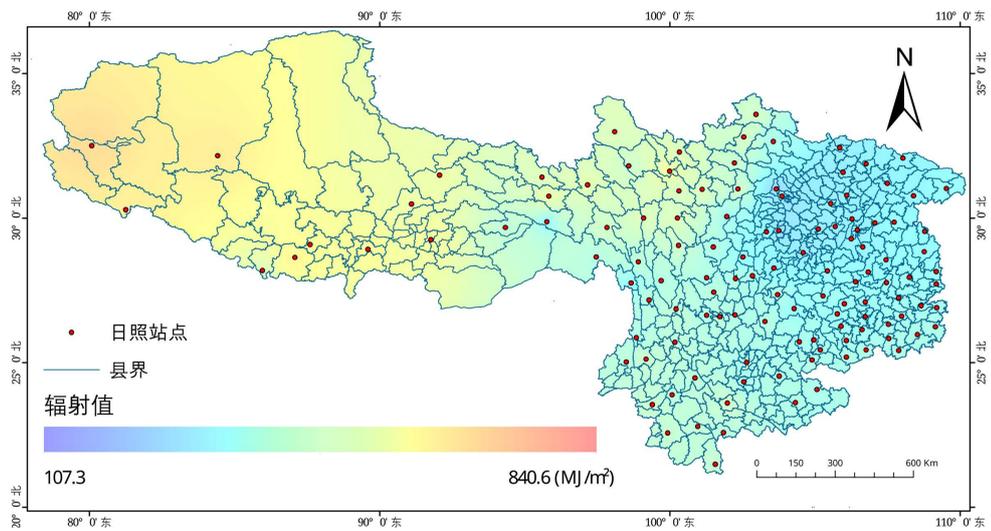
(d)



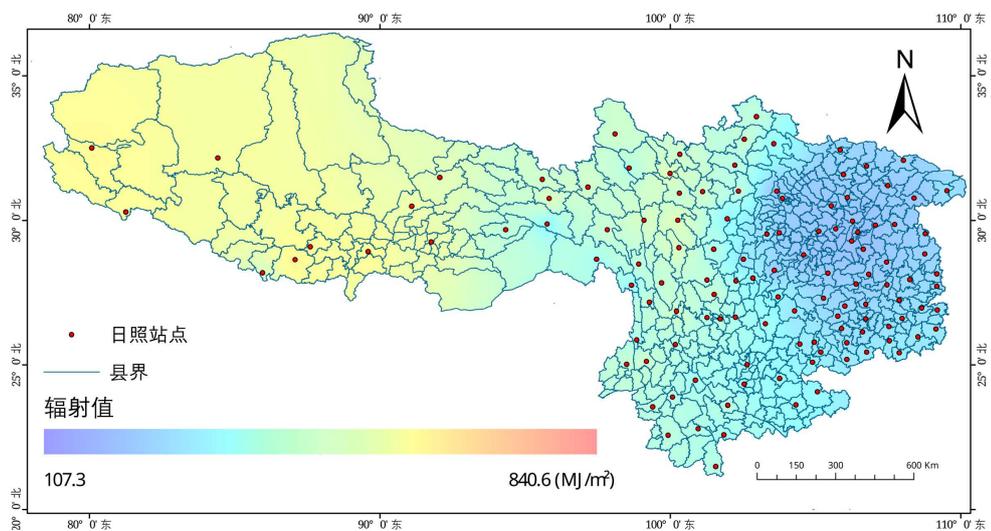
(e)



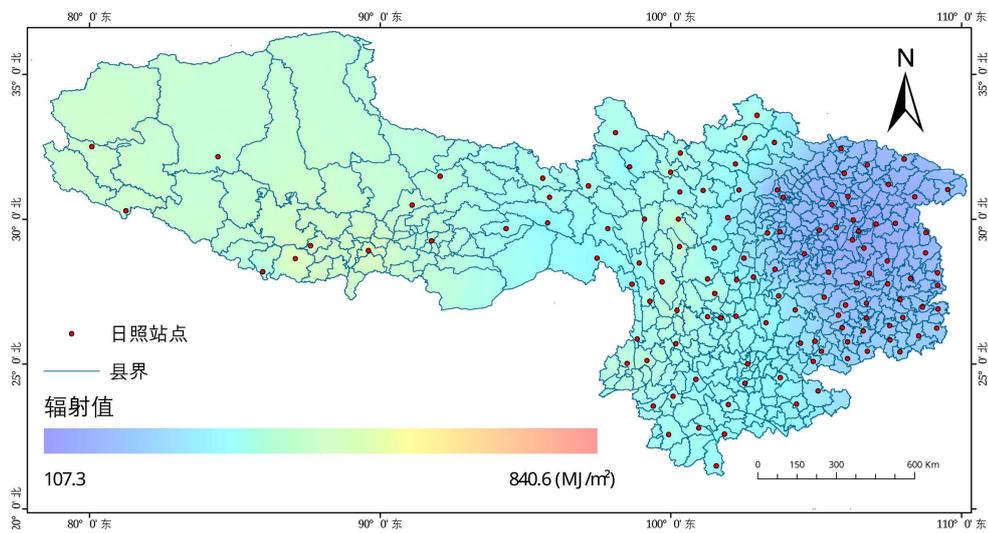
(f)



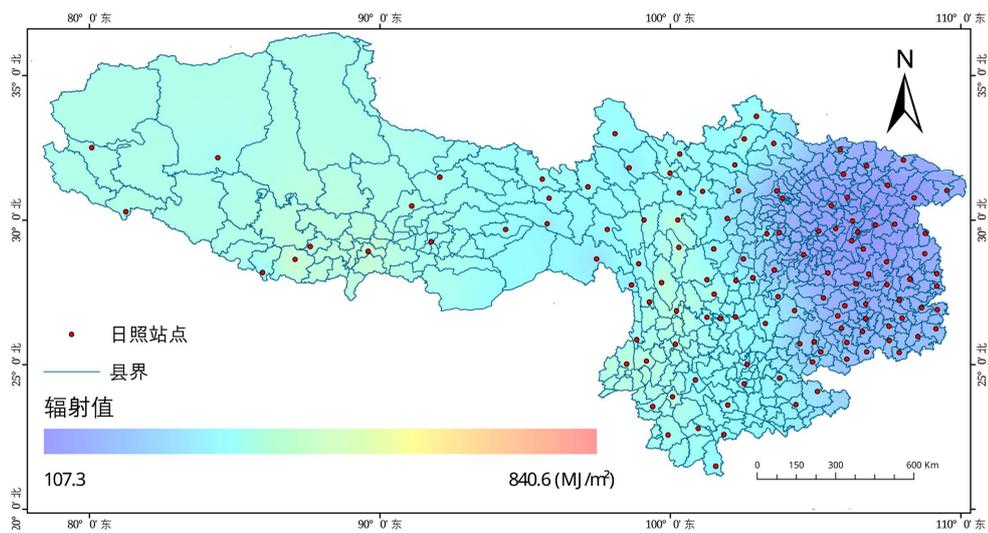
(g)



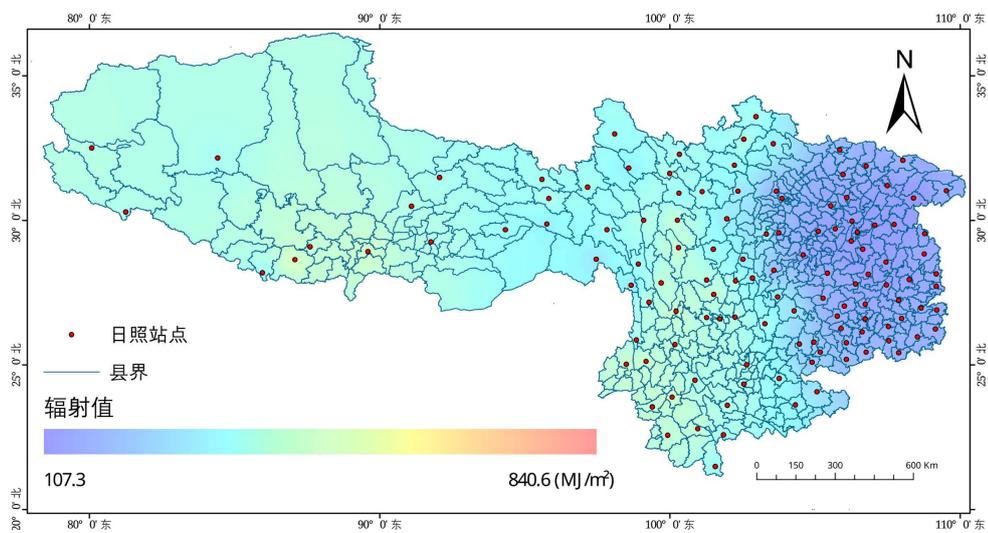
(h)



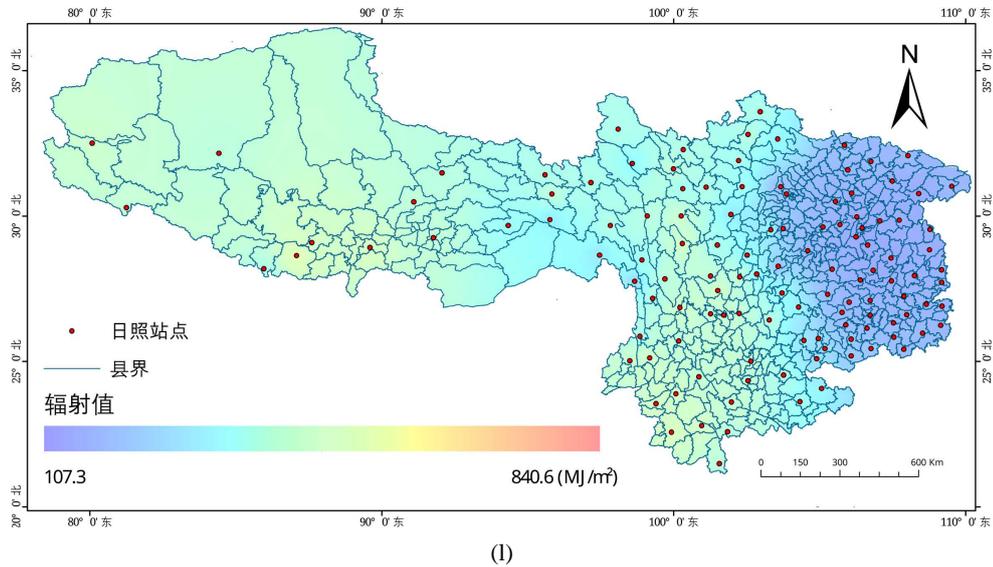
(i)



(j)



(k)



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2556号的标准地图制作，底图无修改。

**Figure 6.** Spatial distribution of monthly solar radiation in Southwest China. (a) March; (b) April; (c) May; (d) June; (e) July; (f) August; (g) September; (h) October; (i) November; (j) December; (k) January; (l) February

**图 6.** 西南地区逐月太阳辐射空间分布。(a) 3月; (b) 4月; (c) 5月; (d) 6月; (e) 7月; (f) 8月; (g) 9月; (h) 10月; (i) 11月; (j) 12月; (k) 1月; (l) 2月

从季节上看，影响春季太阳总辐射的主要因子是总云量和水汽含量；总云量、能见度和水汽含量都对夏季太阳总辐射有显著影响；秋季和冬季太阳总辐射主要影响因子是总云量。总云量与太阳总辐射的相关性全部通过了 0.01 的显著性检验，水汽含量与年际太阳总辐射、春夏两季太阳总辐射的相关性通过了 0.05 的显著性检验，能见度与夏季太阳总辐射的相关性通过了 0.01 的显著性检验。综上所述，总云量是影响太阳总辐射的主要因子，其次是整层大气水汽含量，能见度对太阳总辐射的影响程度最小。

**Table 2.** Results of correlation between influencing factors of solar radiation and solar total radiation

**表 2.** 影响太阳辐射因子与太阳总辐射相关性结果

日均值	年际	春季	夏季	秋季	冬季
太阳辐射(MJ/m <sup>2</sup> )	13.18	15.40	16.04	11.65	9.32
总云量(%)	63.93	63.80	76.04	63.41	53.00
相关性(r)	-0.42**	-0.38**	-0.69**	-0.70**	-0.40**
能见度(m)	20955.70	21035.16	22697.23	20758.64	19706.51
相关性(r)	0.23	0.18	0.37**	0.01	-0.03
整层大气水汽含量(cm)	6.48	4.42	12.94	6.84	1.89
相关性(r)	-0.28*	-0.28*	-0.32*	-0.02	-0.15

注：\*表示在 0.05 水平(双侧)显著相关，\*\*表示在 0.01 水平(双侧)显著相关。

#### 4. 主要结论

本文利用线性回归法、Mann-Kendall 检验法、Pearson 相关性检验法等方法，对西南地区 1957~2017

年太阳辐射时空分布特征及其影响因子进行分析, 得出以下结论:

(1) 1957~2017 年西南地区太阳辐射年值以 $-1.14 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的速度下降, 但下降趋势不显著。太阳总辐射在 1995 年发生突变, 突变前后的年太阳总辐射减少  $68.66 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 。

(2) 1957~2017 年西南地区的不同月份太阳总辐射变化呈单峰形分布, 太阳总辐射最大的月份是 5 月、7 月和 8 月, 分别是  $512.99 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 、 $509.60 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 、 $506.71 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 。不同季节的太阳总辐射分布情况表现为夏季最强, 其次是春季, 冬季最弱, 并且夏季的太阳总辐射变化趋势与全年太阳总辐射变化趋势一致。1957~2017 年西南地区年辐射以及不同月份辐射空间分布均表现为自西向东降低的分布特征。

(3) 影响太阳辐射的相关因子中, 总云量的影响程度最大, 其次是整层大气水汽含量, 能见度的影响程度最小。总云量对年际和不同季节的太阳总辐射均有显著影响, 相关系数最小为春季,  $-0.38$ , 最大为秋季,  $-0.70$ ; 整层大气水汽含量对年际和春、夏两季的太阳总辐射有显著影响, 相关系数最大为夏季,  $-0.32$ ; 能见度仅对夏季太阳总辐射有显著影响, 相关系数为  $0.37$ 。

## 基金项目

中国气象科学研究院科技合作项目(2024002K): 复杂地形区太阳能资源精细化评估及价值转化研究与实践——以中国西南地区为例。

2025 年度大学生创新训练项目(X202510621004): 西南地区太阳辐射时空特征分析及太阳能资源评估研究。

## 参考文献

- [1] 田荣湘, 康玉香, 张文滨, 等. 太阳辐射和大气环流在青藏高原气温季节变化中的作用[J]. 浙江大学学报(理学版), 2017, 44(1): 84-95.
- [2] 齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系[J]. 物理学报, 2015, 64(8): 2-6.
- [3] 孟浩, 陈颖健. 我国太阳能利用技术现状及其对策[J]. 中国科技论坛, 2009(5): 96-101.
- [4] 李芬, 陈正洪, 成驰. 太阳能光伏发电量预报方法的发展[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(2): 136-141.
- [5] Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C.N., Dutton, E.G., et al. (2005) From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. *Science*, **308**, 847-850. <https://doi.org/10.1126/science.1103215>
- [6] Ohmura, A. (2009) Observed Decadal Variations in Surface Solar Radiation and Their Causes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **114**, D00D05. <https://doi.org/10.1029/2008jd011290>
- [7] Wild, M. (2009) Global Dimming and Brightening: A Review. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **114**, D00D16. <https://doi.org/10.1029/2008jd011470>
- [8] Alpert, P., Kishcha, P., Kaufman, Y.J. and Schwarzbard, R. (2005) Global Dimming or Local Dimming? Effect of Urbanization on Sunlight Availability. *Geophysical Research Letters*, **32**, L17802. <https://doi.org/10.1029/2005gl023320>
- [9] 查良松. 我国地面太阳辐射量的时空变化研究[J]. 地理科学, 1996(3): 41-46.
- [10] 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究[J]. 应用气象学报, 1998(1): 25-32.
- [11] 陈志华. 1957-2000 年中国地面太阳辐射状况的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(大气物理研究所), 2005.
- [12] 谢今范, 张婷, 张梦远, 等. 近 50a 东北地区地面太阳辐射变化及原因分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(12): 2127-2134.
- [13] 温松楠. 西北地区太阳辐射时空变化特征研究[J]. 河南科技, 2025, 52(1): 87-91.
- [14] 钱莉, 刘明春, 杨永龙, 等. 1960 年至 2009 年河西走廊东部太阳辐射变化规律及太阳能资源利用分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 823-828.
- [15] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. 气象学报, 1963(1): 78-96.

- [16] 左大康. 现代地理学词典[M]. 北京: 商务印书馆, 1990.
- [17] 邓艳君, 邱新法, 曾燕, 等. 几种水平面太阳总辐射量计算模型的对比分析[J]. 气象科学, 2013, 33(4): 371-377.
- [18] 申彦波, 王标. 近 50 年中国东南地区地面太阳辐射变化对气温变化的影响[J]. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1457-1465.